



Choix de procédés de parachèvement pour les pièces en matériaux composites = Choice of finishing process for composite parts

Aude Caillaud, Mathieu Ritou, Sébastien Garnier, Benoît Furet

► To cite this version:

Aude Caillaud, Mathieu Ritou, Sébastien Garnier, Benoît Furet. Choix de procédés de parachèvement pour les pièces en matériaux composites = Choice of finishing process for composite parts. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00389695

HAL Id: hal-00389695

<https://hal.science/hal-00389695>

Submitted on 11 Jun 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Choix de procédés de parachèvement pour les pièces en matériaux composites

Choice of finishing process for composite parts

Aude Caillaud, Mathieu Ritou, Sébastien Garnier et Benoit Furet

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes
Université de Nantes – 1 rue de la Noë 44321 Nantes
e-mail : aude.caillaud@ircyn.ec-nantes.fr

Résumé

Le processus d'élaboration des matériaux composites se termine souvent par une phase de finition que l'on appelle le parachèvement. Les couples procédés-outils utilisés pour réaliser ces opérations de détournage et de perçage sont très diversifiés : usinage avec fraises en carbure monobloc ou PCD (Poly Cristallin Diamond), outils diamantés, jet d'eau, laser... Cependant, les paramètres permettant d'effectuer un choix optimum, qui associe à chaque pièce le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à sa réalisation, sont relativement nombreux : la nature du matériau (fibre, résine, plan de drapage...), la géométrie de la pièce (dimensions, morphologie...) ou encore les spécifications qui lui sont associées (défauts maximum d'écaillage, de délaminage, état de surface...). Une stratégie a donc été mise en place pour obtenir, entité par entité, un classement des procédés exploitables sur des critères objectifs. Deux méthodes d'analyse locale ont été mises en concurrence : d'une part, une méthode quantitative ; d'autre part, une méthode qualitative mettant en œuvre la maison de la qualité (House Of Quality). La poursuite des travaux consistera à globaliser l'approche afin de définir la gamme complète et optimale du parachèvement des pièces composites.

Abstract

Manufacturing process of composite materials often ends with finishing operations. Processes and tools used for these operations (like trimming and drilling) are very diversified: machining with carbide or PCD (Poly Crystalline Diamond) endmills, diamond wheel or disc, water jet, laser... Besides, parameters which permit to make an optimum choice are abundant: nature of the material (fiber, resin, plying sequence...), geometry of the part (size, morphology...) and associated specifications (surface roughness, delamination, interlaminar voids, fibre pullout surface...). A strategy has been established in order to obtain, for each manufacturing feature, a classification of processes using objective criteria. Two methods of local analysis have been implemented and compared: on the one hand, a quantitative method; on the other hand, a qualitative method based on the House Of Quality (HOQ). Further works will propose a global approach in order to define the complete and optimum trimming process which suits the best the realization of a part.

Mots Clés : parachèvement, matériaux composites, aide à la décision, procédés d'usinage

Keywords: trimming, composite materials, decision making, machining process

1. Introduction

En pleine expansion sur le marché, les matériaux composites sont aujourd'hui présents dans des secteurs d'activités très diversifiés tels que le domaine des loisirs et du sport, de l'industrie mécanique, du bâtiment et du transport (nautisme, aéronautique...). Ce développement est principalement dû aux atouts techniques et technologiques que ces matériaux présentent : gain de poids réalisé par rapport aux matériaux traditionnels (à iso-résistance), excellentes propriétés mécaniques (rigidité, tenue aux chocs et à la fatigue...) et chimiques (résistance à la corrosion)... De plus, la multiplicité des procédés de mise en forme disponibles pour la réalisation des pièces autorisent la conception de pièces et de structures aux formes complexes, permettant l'intégration de nombreuses fonctions. Ces procédés (tels que le moulage par projection simultanée, le RTM ou encore le drapage) sont considérés comme des procédés par ajout de matière. C'est pourquoi des opérations de finition, essentiellement de détournage et de perçage, sont réalisés sur la pièce après sa mise en forme. Cette phase de finition, que l'on appelle parachèvement, permet d'enlever les pourtours non-conformes et non-homogènes des pièces pour obtenir des formes et des dimensions précises, des surfaces fonctionnelles ou encore des trous pour un futur assemblage [1].

Les couples outils-procédés disponibles pour réaliser ces différentes opérations de parachèvement sont nombreux [2]. D'une part, il existe des procédés considérés comme conventionnel dans le sens où un outil est en contact direct avec la pièce, et qu'il est monté dans une broche animée d'un mouvement de rotation. C'est le cas notamment de l'usinage avec les fraises en carbure monobloc ou en PCD (Poly Cristallin Diamond) et avec les outils diamantés tels que la meule ou le disque diamanté, qui permettent de palier aux caractères abrasifs des matériaux composites. D'autre part, de nouveaux procédés émergent comme la découpe au jet d'eau - jet d'eau abrasif, la découpe laser ainsi que la découpe ultrasonore [3] [4]. Cette multiplicité de procédés de parachèvement, toujours plus nombreux, rend de plus en plus difficile le choix à effectuer.

S'ajoute à cette difficulté le nombre de paramètres à intégrer. La nature du matériau (fibre, résine, séquence de drapage...), la géométrie de la pièce (dimensions, accessibilité...) et les spécifications qui lui sont associées (défaut maximum d'écaillage, état de surface...) sont autant d'exemples d'éléments devant être pris en compte pour aboutir à un choix optimum, permettant d'associer à une pièce le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à sa réalisation [5]. Or, peu de personnes possèdent aujourd'hui les compétences techniques pour effectuer ce choix, indispensables pour répondre aux critères qualitatifs, productifs et économiques associés à la fabrication d'une pièce.

L'objectif de nos travaux est donc de proposer une méthode permettant d'associer à chaque pièce, le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à sa réalisation. Pour cela, une stratégie en trois points, permettant d'obtenir une solution optimisée et potentiellement multi-procédés, a été mise en place. Les travaux présentés dans ce papier portent sur les deux premières phases de cette méthode : la réalisation d'une analyse locale et d'une analyse topologique. En ce qui concerne l'analyse locale, deux méthodes ont été mises en concurrence : d'une part, une méthode quantitative, d'autre part, une méthode qualitative mettant en œuvre la maison de la qualité (HOQ). Enfin, des exemples industriels seront utilisés pour valider cette méthode, afin d'apporter par la suite des perspectives aux travaux proposés. Mais, dans un premier temps, les problématiques associées à l'usinage de matériaux composites vont être présentées.

2. Introduction au parachèvement de matériaux composites

Actuellement, le ratio masse volumique/résistance mécanique est l'atout principal des composites par rapport aux matériaux traditionnels. C'est ce qui permet d'ailleurs de les rendre compétitifs par rapport aux matériaux métalliques par exemple. Cependant, les utilisateurs sont de plus en plus exigeants sur leurs caractéristiques, ce qui explique d'ailleurs la présence de composites de plus en plus performants sur le marché. Il est donc nécessaire en parallèle, de faire évoluer les techniques d'usinage et les procédés qui leur sont dédiées, à travers notamment leurs conditions de coupe et leurs limitations technologiques [6].

La première catégorie de procédés de parachèvement utilisé regroupe les outils dits conventionnels. Certains d'entre eux, comme les fraises carbures et les outils PCD, sont déjà utilisés depuis longtemps dans le cadre de l'usinage de matériaux métalliques. Ils permettent d'obtenir une excellente qualité de surface usinée. Cependant, leur usure prématurée, causée par le fort pouvoir abrasif des composites, limitent leur utilisation. C'est pourquoi des outils diamantés, tels que les disques et les meules, ont fait leur apparition. Leur principal inconvénient est de rendre obligatoire la lubrification durant la coupe afin d'éviter leur encrassement et améliorer ainsi leur durée de vie (Fig. 1).



Fig. 1. Meule encrassée (gauche), délaminage et plis non coupés francs en fraisage et perçage (droite).

En raison du caractère hétérogène des matériaux composites, l'ensemble de ces outils « conventionnels » provoquent la création de nombreux défauts sur la surface de coupe : écaillage, délaminage, peluchage ou encore plis non coupés francs (Fig. 1) [7]. C'est pourquoi une nouvelle catégorie de procédés émergent actuellement dans le domaine du parachèvement de matériaux composites : les procédés d'usinage dits « avancés ». Les avantages offerts par ces procédés sont nombreux. Par exemple, les efforts engendrés par la coupe sont relativement faibles ce qui permet de limiter leur impact sur le matériau parachévé. La qualité obtenue est donc améliorée et les caractéristiques intrinsèques du matériau non dégradées. De plus, les déchets créés sous forme de poussières sont beaucoup moins nombreux.

Parmi ces procédés avancés, la découpe au jet d'eau est sans conteste la plus développée industriellement. D'autres sont encore au stade du développement. C'est le cas notamment de la découpe laser : des températures importantes sont nécessaires pour vaporiser les fibres, et ce quelques soient leur nature. Les matrices polymères sont alors fortement dégradées, ce qui induit une diminution locale des caractéristiques du matériau [8]. La découpe par ultrasons connaît elle aussi quelques limitations techniques : seuls les matériaux crus, mi-cuits ou cuits mais de très faibles épaisseurs peuvent être découpés. En raison de l'état de surface qu'elle permet d'obtenir, elle semble tout de même prometteuse.

Des applications spécifiques existent pour l'ensemble des procédés de parachèvement présenté, qu'ils appartiennent à l'une ou à l'autre catégorie. Le choix s'effectue en fonction de deux types d'informations. D'un côté, celles concernant la pièce à réaliser : la nature du composite, son architecture, la géométrie et la topologie de la pièce, la qualité souhaitée, la cadence de production... De l'autre, les caractéristiques propres à chaque procédé telles que les conditions de coupe (vitesse d'avance) et les limitations techniques (épaisseur maximum, qualité obtenue...). La mise en parallèle de ces données permet de choisir le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à la réalisation d'une pièce. Pour illustrer ce qui vient d'être dit, plusieurs exemples peuvent être cités. Les meules diamantées permettent d'obtenir une meilleure qualité de surface dans les composites en fibres de carbone que le jet d'eau. Ou encore, la vitesse d'avance dans les matériaux en fibres de verre est deux fois plus importante avec un disque diamanté plutôt qu'avec un outil PCD. Une base de données « procédés » a été réalisée en prenant en compte l'ensemble de ces informations. Utilisée dans la suite de notre étude, elle synthétise les connaissances techniques acquises à travers divers essais et expériences industrielles [9].

3. Présentation de la stratégie adoptée

3.1 Objectifs de l'étude

Comme nous venons de le préciser, les procédés de parachèvement exploitables industriellement sont nombreux, ce qui rend leur sélection difficile. L'objectif de nos travaux de recherche est donc de trouver le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à la réalisation d'une pièce, au vu des caractéristiques recherchées.

3.2 Données d'entrée

Etant donné qu'une solution potentiellement multi-procédés est recherchée, la pièce est considérée comme un ensemble d'entités d'usinage à parachever (Fig. 3) [10]. Ainsi, pour chacune d'elles, un classement des procédés de parachèvement répondant au mieux aux critères d'usinabilité à optimiser (temps, coût, qualité...) pourra être trouvé.

L'approche proposée est dédiée à la détermination de procédés de parachèvement pour des pièces en matériaux composites. C'est pourquoi seulement deux types d'entités d'usinage, correspondant aux opérations de finition les plus courantes, sont ici considérés : les contours et les perçages. Dans les deux cas, il est nécessaire de recueillir les caractéristiques qui définissent ces entités puisque ce sont ces dernières qui permettront de choisir le procédé de parachèvement le plus adapté. Si l'une d'elles est modifiée, le procédé sélectionné sera potentiellement différent. Une liste de onze caractéristiques a été retenue pour les contours et huit pour les perçages (Tab. 1). Dans le cas d'une opération de détournage, une nouvelle entité d'usinage est créée dès qu'une caractéristique diffère localement. En ce qui concerne les opérations de perçage, chaque trou est considéré comme une entité d'usinage différente.

	Matériau	Géométrie	Topologie	Qualité géométrique
Entité contour	- Nature du matériau	- Longueur - Epaisseur - Concavité - Rayon de courbure - Contour extérieur/ intérieur	- Point de départ - Point d'arrivée - Surface en arrière-plan	- Tolérances dimensionnelles - Rugosité
Entité perçage	- Nature du matériau	- Rayon - Profondeur - Trou débouchant ou non	- Centre du perçage - Surface en arrière-plan	- Tolérances dimensionnelles - Rugosité

Tab. 1. Caractéristiques descriptives des entités de parachèvement.

Prenons quelques exemples. Dans le cas d'un contour, il est important de connaître la courbure et la concavité des surfaces à détourner. Ainsi, si la surface est concave, le disque diamanté sera éliminé, de même que les meules diamantées si de surcroît le rayon de courbure est très faible (moins de 3 mm). En ce qui concerne les perçages, il est nécessaire de savoir si le trou à réaliser est débouchant ou non. S'il ne l'est pas, certains procédés tels que la découpe au jet d'eau, au fil diamanté ou au laser doivent être mis de côté.

L'ensemble des entités d'usinage de la pièce, ainsi que les informations associées à chacune d'elles (tableau précédent dûment complété) constituent les données d'entrée de notre système. Elles sont extraites de la maquette numérique de la pièce. Dans notre cas, la collecte de ces données a été réalisée manuellement, mais elle pourra être automatisée à l'avenir.

3.3 Stratégie de résolution

La problématique peut être formalisée sous la forme du schéma suivant (Fig. 2). Afin de déterminer le processus de parachèvement de la pièce (couple procédé-outil, ressource et conditions opératoires associées à chaque entité de fabrication), un outil d'aide à la décision est proposé. Il repose sur une stratégie en trois points : la réalisation successive d'une analyse locale, d'une analyse topologique, puis d'une analyse globale. Cette stratégie permet d'aboutir à un choix optimisé et potentiellement multi-procédé.

La première étape consiste à effectuer une analyse locale de la pièce. Il s'agit d'étudier chacune des entités d'usinage qui composent la pièce, indépendamment les unes des autres afin de déterminer quels procédés de parachèvement sont souhaitables. Différentes données caractérisent ces entités : la nature du matériau, la géométrie de la pièce (dimensions, accessibilité), la qualité (tolérances géométriques, spécifications dimensionnelles, rugosité) et la topologie (position de l'entité, appartenance à un contour...). En fonction de ces données, l'objectif est de classer pour chaque entité, les procédés de parachèvement selon différents critères (capabilité, coût et temps de réalisation) et d'écarter les procédés incompatibles. Pour cela, une base de données relative aux procédés de parachèvement est utilisée (conditions de coupe, limites des procédés...). Afin de réaliser cette étape, une méthode quantitative et une méthode qualitative ont été mises en place et testées en parallèle.

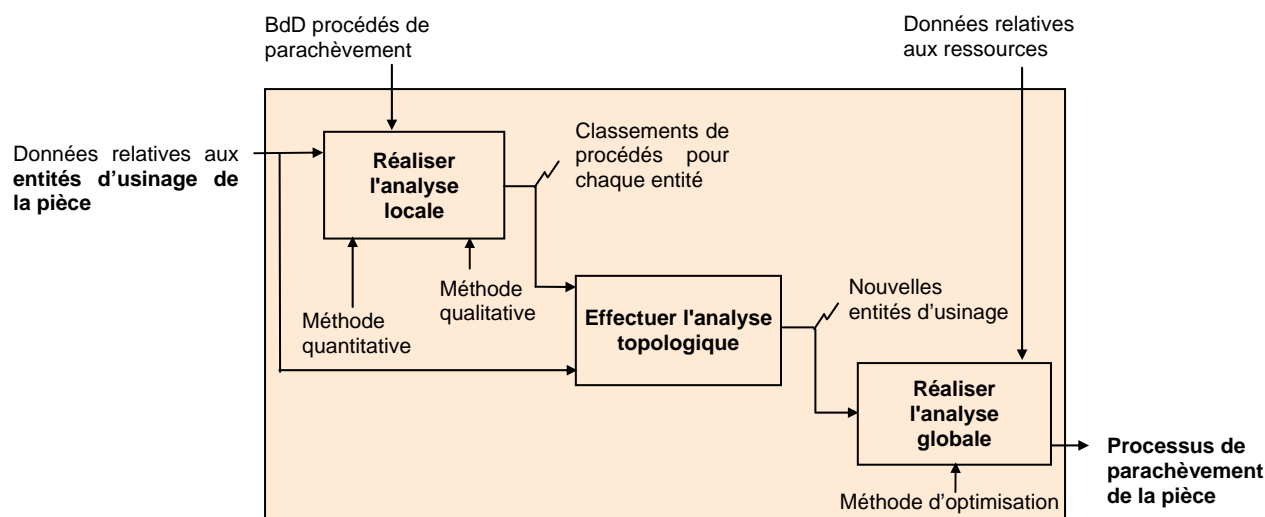


Fig. 2. Schématisation de la stratégie choisie.

La seconde étape consiste à réaliser une analyse topologique. Celle-ci a pour objectif de regrouper les entités d'usinage entre elles afin de simplifier le problème en diminuant le nombre d'entités à traiter. Dans le cas des entités contours par exemple, si deux entités sont adjacentes et ont obtenues les mêmes classements de procédés lors de l'analyse locale, alors elles sont regroupées pour ne former qu'une seule et nouvelle entité d'usinage [10].

Enfin, la dernière étape, qui ne sera pas traitée dans cet article, consistera à réaliser une analyse globale de la pièce qui permettra de prendre en compte également l'enchaînement de la réalisation des entités. En effet, l'analyse locale permet d'avoir une approche seulement partielle de la fabricabilité puisqu'elle se situe à un niveau de décision lié uniquement à l'entité. Ce n'est pas suffisant pour optimiser le processus de parachèvement de l'ensemble d'une pièce composite. L'analyse globale sera donc nécessaire pour prendre en compte l'enchaînement de la réalisation des entités, en intégrant l'ensemble des données relatives à la pièce, aux procédés, ainsi qu'aux ressources (notamment les changements d'outils et de posages, les cadences machines...).

3.4 Limites de l'étude

Les travaux effectués se limitent au parachèvement de pièces composites à matrice polymère. Par la suite, différents matériaux et procédés de parachèvement pourront être ajoutés. Dans notre étude, les couples procédés-outils envisagés pour réaliser les opérations de détournage et perçage sont les suivants :

P : Outil PCD	D : Disque diamanté
C : Outil Carbure	J : Jet d'eau
M : Meule diamantée	L : Laser

3.5 Présentation des cas d'étude

Afin de vérifier la validité de notre stratégie, elle a été testée sur deux cas d'études industriels (Fig.3) :

- un plan vasque en matériau composite (170 x 550 x 950 mm) : fibres de verre / résine polyester insaturé ;
- une pointe avant d'avion en matériau composite (4 x 4 x 5,8 m) : fibres de carbone / résine époxy.

Ce type de pièce est représentatif des applications de parachèvement de pièces en matériaux composites. Elles ont été choisies dans l'optique de balayer un maximum de situations, en termes de matériaux, dimensions et formes (surfaces planes pour l'une, plutôt courbes pour la seconde).

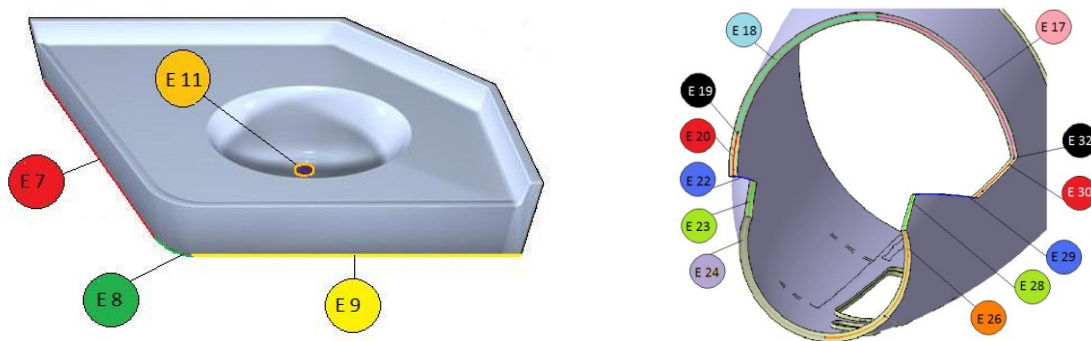


Fig. 3. Les différentes entités géométriques des pièces tests.

4. Méthode d'analyse locale

A partir des données d'entrée du problème (Fig. 1), la première étape consiste à réaliser l'analyse locale de la pièce. L'objectif est de classer pour chaque entité, les procédés de parachèvement selon différents critères d'usinabilité, et d'écarter les procédés incompatibles. Deux méthodes d'analyses locales ont été menées en parallèle afin de comparer les résultats obtenus.

4.1 Méthode quantitative

La méthode proposée se base sur la mise en place de deux fonctions qui permettent d'obtenir, pour chaque entité i de la pièce réalisée par le procédé j , un indice de temps T_j^i et un indice de coût de fabrication C_j^i . Pour cela, en fonction des caractéristiques de chaque entité, des conditions opératoires sont déterminées, et ce pour chaque procédé de parachèvement envisagé. Ces conditions permettent de calculer les deux indices de temps et de coût, qui qualifient les procédés pour chaque entité.

De nombreux auteurs utilisent ce type de méthode pour évaluer les temps et les coûts de fabrication d'une pièce. Les fonctions mises en place atteignent des niveaux de complexité différents en fonction des paramètres pris en compte. Certains intègrent seulement le temps et le coût de fabrication (occupation machine) [11] [12], d'autres y ajoutent le coût des outils, de la matière première utilisée, des frais fixes [13]. Enfin, des modèles plus évolués, travaillant à partir d'entités de fabrication, intègrent les coûts de manutention et de préparation des outils de production entre la réalisation de deux entités [14].

4.1.1 Critère de temps : T_j^i

L'objectif étant de départager les différents procédés de parachèvement entre eux, les temps d'approche et de dégagement de l'outil, pratiquement similaires quelque soit le procédé de parachèvement utilisé, sont ici négligés. Les temps de chargement et de déchargement de l'outil sont également mis de côté au niveau de l'analyse locale puisqu'on ne sait pas quel sera l'enchaînement des entités dans la gamme de fabrication finale. Seul le temps de fabrication T_j^i est donc pris en compte. Afin de le calculer, deux catégories de procédés ont été envisagées (Tab. 2) : ceux permettant de réaliser l'entité en une seule passe comme le jet d'eau, et ceux nécessitant éventuellement plusieurs passes, comme les outils PCD... En ce qui concerne la réalisation des perçages, deux stratégies sont adoptées : si le diamètre est inférieur à 25 mm, un perçage au foret sera effectué ; s'il est supérieur, une stratégie de perçage hélicoïdal sera utilisée (le calcul est alors similaire à un contourage).

4.1.2 Critère de coût : C_j^i

Le critère de coût C_j^i proposé intègre deux composantes : le coût de l'outil ainsi que le coût horaire de la machine, qui inclut le coût de la main d'œuvre et le coût d'investissement de la machine. Le coût horaire est associé non seulement au procédé de parachèvement, mais également au nombre d'axes nécessaires pour réaliser la pièce (coût horaire d'une machine 3 axes inférieur à celui d'une machine 5 axes). Dans le

cas de la découpe jet d'eau ou laser, les coûts associés à l'usure de l'outil (buse) sont considérés comme faibles et donc intégrés dans le coût horaire.

CONTOURNAGE	TEMPS DE FABRICATION	COUT DE FABRICATION
	En plusieurs passes : outils PCD, carbures, meules et disques diamantés	
	$T_i^j = \frac{L_i}{Vf_d^j} \cdot \text{arrondi sup} \left(\frac{ap_j}{e_i} \right)$	$C_i^j = T_i^j \cdot C_H^j + \frac{L_i \cdot C_O^j}{L_r^j} \cdot \text{arrondi sup} \left(\frac{ap_j}{e_i} \right)$
	En une seule passe : jet d'eau, laser	
	$T_i^j = \frac{L_i}{Vf_d^j}$	$C_i^j = T_i^j \cdot C_H^j$

Tab. 2. Calculs des indices de temps de fabrication T_i^j et de coût de fabrication C_i^j associés à l'entité i à détourer avec le procédé j .

Avec :

- L_i longueur de l'entité i
- e_i épaisseur de l'entité i à découper
- Vf_d^j vitesse d'avance du procédé j en découpe
- ap_j profondeur de passe maximum réalisable avec le procédé j
- L_r^j longueur réalisable avec l'outil associé au procédé j avant usure
- C_H^j coût horaire de la machine (coût machine, coût main d'œuvre ...)
- C_O^j coût outil associé au procédé j

La méthode quantitative est relativement simple à mettre en place. Le travail le plus laborieux est de constituer la base de données sur les conditions de coupe associées aux différents matériaux composites. Dans notre étude, elle a été mise en place à partir d'essais, de données issues de la littérature et de données expérimentales issues de partenariats industriels. Ses atouts principaux sont d'être facilement exploitables et compréhensibles par les divers utilisateurs puisque les indices obtenus (temps et coût de fabrication) sont continuellement utilisés dans les entreprises.

4.2 Méthode quantitative : House Of Quality

La méthode « Quality Function Deployment » (QFD), et plus particulièrement l'outil de la maison de la qualité (HOQ), a été développée par Akao afin d'améliorer le processus de développement d'un nouveau produit, à travers la satisfaction des clients. Il se présente sous la forme d'une matrice qui permet d'établir et d'évaluer les relations entre le besoin des clients et les caractéristiques du produit (Fig. 4) [15].

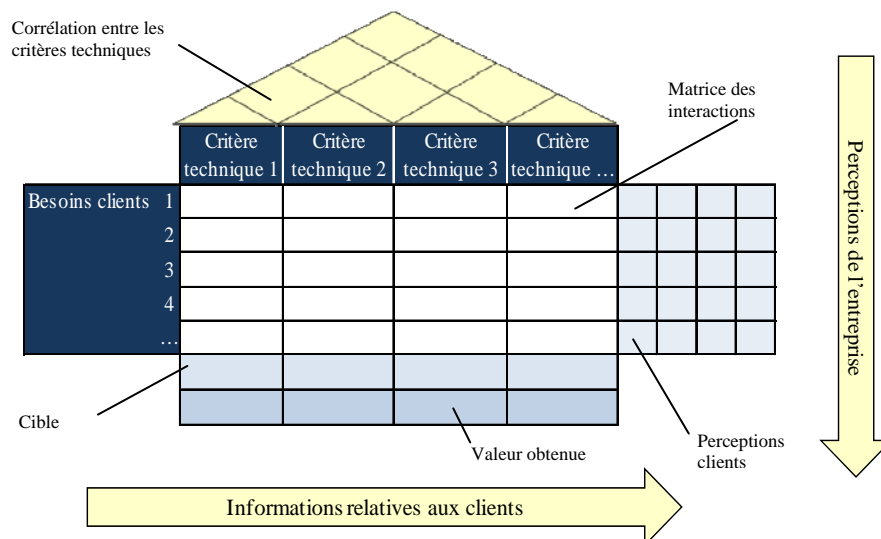


Fig.4. Maison de la qualité initiale.

Tout comme Lowe [16] et Shankar [17], cet outil d'aide à la décision a été adapté afin de classer les différents procédés de parachèvement. Pour cela, différentes simplifications ont été effectuées au niveau de la forme globale de la HOQ (Tab. 3). Les besoins clients correspondent ici aux caractéristiques de la pièce à réaliser et les caractéristiques techniques aux critères de sélection des procédés. La matrice des interactions reste elle présente de même que le calcul du résultat final.

4.2.1 Utilisation de l'outil HOQ : point de vue de l'utilisateur

La méthode HOQ est relativement transparente pour l'utilisateur. Effectivement, une fois les données relatives aux entités renseignées, une HOQ est mise en place pour chacune des entités associées à chacun des procédés de parachèvement (Tab. 3). L'utilisateur remplit la colonne correspondant aux caractéristiques de l'entité, et la note associée est automatiquement calculée.

Entité 20 - Outil carbure			COMMENT : critères de choix des procédés		
			Capabilité	Coût	Rapidité
			1	1	1
QUOI : caractéristiques entité	Matériau	carbone/epoxy	3	3	1
	Longueur	999	3	1	1
	Epaisseur	2,2	3	1	3
	Rayon minimum	6029	3	3	3
	Concave-Convexe	concave			
	Contour ext / int	extérieur	3	3	3
	Surf. arrière plan	non	3	3	3
	Tolérances dim.	1,6	5	3	3
	Rugosité	10	5	3	3
			33	23	19
			COMBIEN : Note par critère		
			75		
			Résultat		

Tab. 3. Maison de la qualité associée à l'entité 20 de la pointe d'avion réalisée par outil carbure.

Afin d'aboutir à ce résultat, deux éléments ont été construits : un outil d'évaluation pour formaliser clairement le problème, ainsi qu'une base de données. Celle-ci permet de synthétiser les informations issues d'expériences industrielles, relatives notamment aux conditions de coupe associées aux différents procédés de parachèvement. La démarche permettant d'aboutir à ce résultat va maintenant être présentée.

4.2.2 Construction de l'outil d'évaluation : point de vue de l'expert

a) Caractéristiques entités et coefficients associés

Les caractéristiques entités mises en place dans l'étude sont au nombre de neuf pour les contours et six pour les perçages. Elles forment des critères de choix pour sélectionner un procédé de parachèvement ou le discriminer. Afin d'éviter toute redondance dans l'analyse, elles ont été choisies pertinemment par une équipe d'experts afin d'assurer qu'elles ne se corrélaient pas. Elles sont regroupées en trois classes distinctes : matériau, géométrie et qualité. Des coefficients de pondération sont affectés à chacune des caractéristiques, au sein même de ces catégories, afin d'équilibrer l'importance de chacune d'elles (Tab. 4).

		Les contours	Coef.	Les perçages	Coef.
Matériau	/3	Matériau	3	Matériau	3
Géométrie	/3	Longueur	1	Profondeur	1
		Epaisseur	1	Diamètre	1
		Rayon minimum	1/3	Débouchant et pas de surface en arrière plan	1
		Concave-convexe-plan			
		Contour extérieur / intérieur	1/3		
Qualité	/3	Surface en arrière plan ou non	1/3		
		Tolérances dimensionnelles	3/2	Tolérances dimensionnelles	3/2
		Rugosité	3/2	Rugosité	3/2

Tab. 4. Coefficients associés aux caractéristiques entités.

b) Critères procédés et coefficients associés

Les critères procédés permettent de vérifier si les procédés sont en mesure de répondre aux exigences des caractéristiques de l'entité considérée. Trois critères ont été mis en place dans l'étude : la capabilité, le coût et la rapidité d'exécution (similaire au triptyque Qualité-Coût-Délai). Le choix restrictif de ces critères a été effectué de sorte à éliminer les éventuelles corrélations entre les différents critères. Des coefficients de pondération, attribués par l'utilisateur, permettent de mettre en avant l'objectif principal de la recherche ; par exemple, s'il souhaite trouver une solution qui permet de réaliser la pièce en un minimum de temps, il affectera un coefficient plus important à ce critère.

c) Matrice des interactions

La matrice des interactions établit la relation entre les caractéristiques de l'entité et les critères d'évaluation des procédés. Elle se remplit avec des symboles ou des valeurs qui permettent d'indiquer à quel degré chaque critère contribue à la satisfaction de chaque caractéristique. Dans notre étude, des chiffres sont utilisés pour simplifier l'analyse des résultats (Tab. 5). Un « 0 » signifie que le procédé n'est pas capable de réaliser l'entité considérée ce qui implique son élimination immédiate.

Echelle de valeurs	Signification
0	Elimination du procédé
1	Peu adapté
3	Moyennement adapté
5	Très adapté

Tab. 5. Echelle de notation.

Les éléments concernant la méthode de remplissage de cette matrice seront vus dans la partie suivante. Précisons cependant que la base de données qui permet ce remplissage est établie une seule fois par des experts. Le remplissage de la matrice est ensuite automatique, donc transparent pour l'utilisateur.

4.2.3 Construction et remplissage de la base de données

L'ensemble de la matrice des interactions se remplit à partir d'une base de données. C'est la clé de voûte de la méthode. Elle synthétise des informations issues de l'expérience industrielle, relatives notamment aux conditions opératoires associées aux différents procédés de parachèvement. Deux bases de données différentes ont été créées : une pour les entités à détourer et une pour les perçages.

La première étape consiste à créer différents niveaux pour chaque caractéristique entité (Tab. 6). Ces niveaux correspondent à des plages de valeurs, sauf pour les données binaires, ce qui assure l'unicité d'appartenance à un niveau.

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Matériau	verre/époxy	verre/polyester	carbone/époxy
Longueur (mm)	$L < 100$	$100 < L < 500$	$500 < L$
Epaisseur (mm)	$E < 5$	$5 < E < 15$	$15 < E$
Tolérances dim. (mm)	$IT < 0,1$	$0,1 < IT < 0,5$	$0,5 < IT$
Rugosité (um)	$Ra < 5$	$5 < Ra < 12$	$12 < Ra$
Contour int. / ext.	Contour extérieur	Contour intérieur	
Surf. arrière-plan	Oui	Non	

Tab.6. Niveaux des caractéristiques pour les entités à détourer.

La seconde étape consiste à remplir la base de données. Toutes les configurations entre les caractéristiques entités et les critères procédés doivent être renseignées. Pour chacun de ces couples, une note doit être attribuée. Plus le procédé est adapté à la réalisation de la caractéristique de l'entité, plus la note est importante (Tab. 5). Tout le système de notation se base sur des valeurs relatives : les procédés sont évalués les uns par rapport aux autres. Un tableau similaire au tableau 7 doit être renseigné par les experts pour chaque caractéristique entité. L'exemple présenté (partie grisée) indique que l'outil carbure 'C' est peu adapté à la réalisation d'une entité de plus de 500 mm de longueur (note de '1'), contrairement au disque qui lui serait un choix optimisé selon ce même critère (note de '5').

		Critères procédés																	
		CAPABILITE						COUT						RAPIDITE D'EXECUTION					
		Procédés																	
		P	C	J	M	D	L	P	C	J	M	D	L	P	C	J	M	D	L
LONGUEUR	L < 100	5	3	3	3	3	3	1	3	3	5	5	3	5	3	3	5	1	3
	100 < L < 500	5	3	3	3	3	3	1	1	3	3	5	3	3	1	3	3	5	3
	500 < L	5	3	3	3	3	3	1	1	3	3	5	3	1	1	1	3	5	1

Tabl. 7. Extrait de la base de données concernant la caractéristique longueur.

Le remplissage de ces différentes cases a été effectué par un groupe de travail, à travers des recherches personnelles sur les procédés de parachèvement, mais également lors de discussions. Il nécessite une méthode de réflexion rigoureuse.

4.2.4. Remplissage de la matrice des interactions

Une fois la base de données complétée par les experts, l'utilisateur doit seulement extraire les caractéristiques des différentes entités de la pièce, puis automatiquement les HOQ sont générées pour chacune des entités. Prenons l'exemple de la HOQ associée à l'entité 20 de la pointe avant d'avion réalisée par un outil carbure (Tab. 3 et Fig. 3). La longueur de cette entité étant supérieure à 500 mm, la note de « 1 » est attribuée à l'interaction entre « longueur » et « rapidité d'exécution », si l'on se réfère à la base de données correspondante (Tab. 7).

Une fois la matrice remplie, le calcul de la note finale se fait automatiquement. Pour cela, les valeurs présentes dans la matrice des interactions sont pondérées par les différents coefficients (caractéristiques entités et critères procédés) avant d'être sommées pour donner le résultat final. Celui-ci permet de quantifier la capacité du procédé à réaliser une entité. Plus la note est importante, et plus le procédé est adapté à sa réalisation.

4.3 Validation des méthodes qualitatives et quantitatives

Les deux méthodes d'analyses locales ont été testées sur deux cas d'études industriels : l'évier et la pointe avant d'avion. Les résultats obtenus permettent d'associer un procédé de parachèvement à chaque entité géométrique. Le tableau 8 présente les résultats obtenus pour l'entité n°20 de la pointe avant d'avion. L'outil le plus apte à la réaliser est donc la meule diamantée. En effet, la note obtenue avec la méthode HOQ est la plus forte, et les indices de temps et de coût de fabrication obtenus avec la méthode quantitative sont les plus faibles.

Entité 20		Procédé de fabrication					
Méthode d'analyse locale		Carbure	PCD	Meule	Disque	Laser	Jet d'eau
Modélisation	Temps production (en sec)	74,9	8,6	9,2	15	20	19,3
	Coût production (en €)	19,9	216,3	1	0,7	1,1	1,07
HOQ	Rapidité d'exécution	19	33,7	33,7	0	0	25
	Coût	23	22,3	35,7	0	0	27,7
	Capabilité	33	41,7	350	0	0	27
	Capa + Coût + Rapidité	75	97,7	99,4	0	0	79,7

Tab. 8. Résultats obtenus suite à l'analyse locale de l'entité 20 de la pointe avant d'avion.

La méthode HOQ, contrairement à la méthode de modélisation, permet d'éliminer les procédés qui ne sont pas capables de réaliser l'entité. C'est le cas, pour l'exemple présenté, du disque qui ne peut réaliser une surface concave ; ainsi que du laser qui ne peut usiner un matériau carbone-époxy d'une épaisseur de 2,2 mm. Une fois ces procédés mis de côté, on peut constater que, quelle que soit la méthode utilisée, les classements obtenus en fonction des temps et des coûts de fabrication sont identiques, exception faite d'un cas. En effet, avec la méthode quantitative, le procédé PCD est plus performant que le procédé meule selon le critère de temps, alors que la méthode HOQ les juge équivalents. On notera tout de même une faible différence entre les deux valeurs obtenues par la méthode quantitative, compte tenu de l'étendue des valeurs obtenues par les autres procédés. On considérera l'écart comme non significatif.

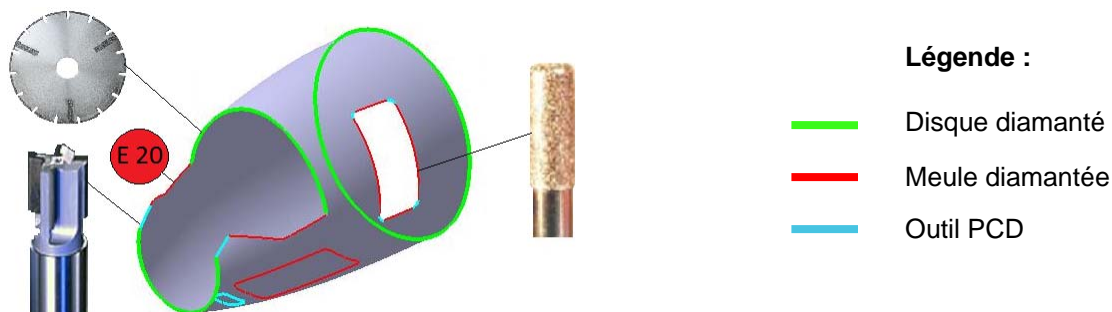


Fig. 5. Résultat obtenu suite à l'analyse locale de la pointe avant d'avion.

Cette étude a été effectuée sur l'ensemble des entités des deux pièces tests, soit onze entités pour le lavabo et quatre-vingt quatorze pour la pointe avant d'avion (Fig. 5). Les résultats montrent une adéquation entre les deux méthodes sur l'ensemble des entités traitées, et ce, quelle que soit leur nature : contour ou perçage, matériau à base de fibres de verre ou de fibres de carbone... Ceci permet donc de valider la pertinence des éléments mis en place pour la sélection de procédés, même si le critère capabilité ne peut pas être comparé.

Une observation importante peut être effectuée sur la figure 5. Les résultats de l'analyse topologique, la seconde étape de la méthode, sont immédiats une fois l'analyse locale réalisée. Dans le cas étudiés, les entités géométriques 'contours', initialement au nombre de soixante-dix seront rassemblées en dix-sept entités de fabrication pour la suite de l'étude (trois groupes 'disque', sept groupes 'meules' et sept groupes 'PCD').

5. Conclusion et perspectives

L'objectif des travaux effectué est de fournir un outil d'aide à la décision afin de trouver le ou les procédés de parachèvement les plus adaptés à la réalisation d'une pièce en matériaux composites. Afin d'y répondre, une stratégie en trois étapes a été mise en place. La première consiste à réaliser une analyse locale afin de classer pour chaque entité, les procédés de parachèvement selon différents critères d'usinabilité, et d'écarter les procédés incompatibles. Pour cela, deux méthodes ont été mises en concurrence : une méthode quantitative (basée sur l'utilisation de fonctions) et une méthode qualitative (HOQ). Les deux reposent sur une base de données procédés, mise en place par des experts, et basée sur leurs expériences industrielles. La pertinence des éléments mis en place a été validée du fait de l'adéquation entre les résultats obtenus. La simplicité d'utilisation des deux méthodes d'analyses locales est à souligner : l'utilisateur n'a pas besoin de connaissances spécifiques pour la mettre en œuvre. D'un côté, la méthode HOQ permet une intégration plus facile des règles métiers. Ainsi, les procédés incompatibles sont écartés et la ou les causes d'une mauvaise note (ou de son élimination) peuvent être identifiées. De plus, le résultat obtenu est homogène, contrairement à la méthode de modélisation avec laquelle on obtient deux indices dépendants, qui s'expriment dans des unités différentes. De l'autre côté, sa flexibilité est remise en cause par l'intégration potentielle de nouveaux procédés.

A partir des résultats obtenus lors de l'analyse locale, les différentes entités d'usinage sont regroupées afin de simplifier le problème d'optimisation globale du processus de parachèvement en diminuant le nombre d'entités à traiter : c'est ce que l'on appelle l'analyse topologique. Enfin, l'analyse globale, qui sera mis en place prochainement, consistera à prendre en compte l'enchaînement de la réalisation des entités, en intégrant l'ensemble des données relatives à la pièce, aux procédés, ainsi qu'aux ressources (notamment les changements d'outils et de posages, les cadences machines...). Ainsi, l'optimisation du parachèvement sera effectuée en considérant la pièce dans sa globalité.

Références

- [1] B. Furet, B. Jolivel, D. Le Borgne, « Milling and drilling of composite materials for the aeronautics: feature aeronautics ». *Journées Nationales sur les Composites*, Vol. 18, 2005.
- [2] B. Furet, « Les dernières avancées en détournage des pièces composites ». *Cetim*, Senlis, 2008.
- [3] S. Chayoukhi, Z. Bouaziz, A. Zghal, "Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, p. 402-411, 2008.
- [4] M.A. Azmir, K. Ahasan, « Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining ». *Journal of Materials Processing Technology*, 2007.
- [5] A. Dessarthe, « Usinage des composites ». *Techniques de l'ingénieur*, AM5215, Octobre 1997.
- [6] R. Teti, « Machining of composite materials ». *Annals of the CIRP*, Vol. 51, n°2, 2002.
- [7] J. Ramkumar, S.K. Malhotra, R. Krishnamurthy, « Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates ». *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, p. 329-332, 2004.
- [8] S. Mazumbar, « Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering ». *CRC Press*, 2002.
- [9] Programme UGV ALU-COMPOSITE, « www.ugv-alu-composites.com », 2008.
- [10] P. Bourdet, « Introduction générale à la conception automatique de gammes d'usinage ». *La gamme automatique en usinage*, Groupe GAMA, Editions Hermes, 1990.
- [11] F. Gillot, « Méthodologie de conception et de fabrication d'outillages prototypes hybrides ». *Thèse*, 2006.
- [12] P. Maropoulos, R. Baker, K. Paramor, « Integration of tool selection with design - Part 2: Aggregate machining time estimation ». *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 107, p.135-142, Novembre 2000.
- [13] A. Esawi, M. Ashby, « Cost based ranking for manufacturing process ». *Proceedings of the Second International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME98)*, Compiègne, Vol. 4, p. 1001-1008, Mai 1998.
- [14] F. H'mida, P. Martin, F. Vernadat, « Cost estimation in mechanical production: the Cost Entity approach applied to integrated product engineering ». *Int. J. Prod. Economics*, Vol. 103, p. 17-35, Août 2005.
- [15] Y. Akao, « Quality Function Deployment ». *Productivity Press*, Cambridge, MA, 1990.
- [16] A. Lowe, K. Ridgway, H. Atkinson, « QFD in new production technology evaluation ». *International Journal Production Economics*, Vol. 67, pp. 103-112, 1999.
- [17] C. Shankar, D. Sammilan, « QFD-based expert system for non-traditional machining processes selection ». *Expert Systems with Applications*, Vol. 32, pp. 1208-1217, 2007.